

FUENTE DEL FÓSFORO ABSORBIDO Y EFECTIVIDAD AGRONÓMICA RELATIVA EN EL MAÍZ EN UN ULTISOL DEL ESTADO COJEDES, VENEZUELA¹

Ana Salas*, Carmen Rivero* y Eduardo Casanova*

RESUMEN

Los fertilizantes fosfatados de mediana solubilidad producidos a partir de roca fosfórica Riecito (RFR) constituyen una alternativa para satisfacer los requerimientos de P de cultivos anuales en el país. La presencia simultánea de formas solubles e insolubles de P en dichos fertilizantes plantea una posible interacción la cual podría mejorar la utilización del P contenido en la RF. Con el propósito de evaluar esta interacción, se emplearon técnicas isotópicas (³²P) a fin de determinar la procedencia del P absorbido por el maíz, *Zea mays* L., y efectividad agronómica relativa (EAR) en mezclas de superfosfato triple (SFT) y RFR a nivel de invernadero. Las cantidades de P absorbido provenientes del suelo (Pdsuelo), la roca fosfórica (Pdfr) y el superfosfato triple (Pdff) en mezclas RFR+SFT fueron comparadas con la absorción de P proveniente de las fuentes aplicadas solas. Los resultados indicaron que la EAR promedio de la mezcla RFR+SFT (72%) fue significativamente superior (P<0,01) al valor obtenido para la RFR (53%), lo cual se atribuyó a una mayor absorción de P proveniente de la mezcla. Valores constantes de Pdffs para la RFR y la mezcla RFR+SFT indicaron que la presencia de P soluble en la mezcla no incrementó la utilización de P del suelo. La fuente soluble por el contrario, produjo una disminución del Pdfr (P<0,05) en la mezcla, lo cual indica una menor utilización de la RFR cuando la misma es mezclada con una fuente soluble. No hubo evidencias de mayor solubilización y/o utilización de la roca como resultado de su combinación con SFT. Estos resultados sugieren que la efectividad de la mezcla, en comparación con la RF sola (RFs), estaría más vinculada a una mayor utilización de la fuente soluble o una mejora de la disponibilidad de calcio en el suelo.

Palabras Clave: Fertilizantes fosfatados parcialmente solubles; roca fosfórica riecito (RFR); superfosfato triple (SFT); mezcla RFR+SFT; técnicas isotópicas (³²P).

1 El trabajo fue financiado en el marco del contrato de Cooperación técnica suscrito entre la Universidad Central de Venezuela. Facultad de Agronomía (Maracay, estado Aragua) y el Organismo Internacional de Energía Atómica (Viena, Austria).

* Profesores. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Agronomía. Instituto de Edafología. Av. Universidad, vía El Limón. Apdo. 4579. Maracay 2101, estado Aragua. Venezuela.

RECIBIDO: enero 31, 2004.

**SOURCE OF ABSORBED PHOSPHORUS AND RELATIVE
AGRONOMIC EFFECTIVENESS IN MAIZE GROWING
ON AN ULTISOL OF COJEDES STATE, VENEZUELA**

Ana Salas*, Carmen Rivero* y Eduardo Casanova*

SUMMARY

Partially soluble phosphate fertilizers manufactured from Riecito phosphate rock (RFR) constitute an alternative to meet P demands of annual crops in Venezuela. The presence of soluble and insoluble forms of P in such fertilizers has suggested a positive interaction that could increase P utilization of the RFR by the crops. To evaluate this interaction, a greenhouse experiment was carried out with the aid of isotopic techniques (^{32}P) in order to determine the relative agronomic effectiveness (EAR) and the source of P taken up by maize, *Zea mays* L., in mixtures of RFR and triple superphosphate (SFT). The amount of P taken up by the plant derived from the soil (P_{dfs}), the phosphate rock (P_{dfr}) and the triple super phosphate (P_{dff}) in the mixture RFR+SFT was compared with the amount of P coming from the P sources applied alone. Results indicated a significantly higher EAR ($P < 0.01$) for the mixture RFR+SFT (72%) as compared with the value given by the RFR (53%) which was due to an increase in the amount of P taken up from the mixture. Relatively constant values of P_{dfs} for the RFR and RFR+SFT treatments suggested that the presence of soluble P in the mixture did not increase the P utilization from the soil. On the contrary, the presence of a soluble form in the mixture significantly decreased the P utilization of the RFR as indicated by the P_{dfr} results. Thus, there was no evidence of a higher solubilization and/or P utilization of the RFR resulting from its combination with the SFT. These results suggest that the effectiveness of the mixture RFR+SFT, in comparison with the RFR applied alone, might be better associated with an improvement in the utilization of the soluble P form and/or an increase in the soil's Ca availability.

Key Words: Partially soluble phosphate fertilizers; riecito rock phosphate (RR); triple superphosphate (TSP); mixture of RR and TSP; isotopic techniques (^{32}P).

1 El trabajo fue financiado en el marco del contrato de Cooperación técnica suscrito entre la Universidad Central de Venezuela. Facultad de Agronomía (Maracay, estado Aragua) y el Organismo Internacional de Energía Atómica (Viena, Austria).

* Universidad Central de Venezuela. Facultad de Agronomía. Av. Universidad. Instituto de Edafología. Vía El Limón. Apdo. 4579. Maracay 2101, estado Aragua. Venezuela.

RECIBIDO: enero 31, 2004.

INTRODUCCIÓN

La disolución de la roca fosfórica (RF) parcialmente acidulada ha sido estrechamente vinculada con la calidad de la RF empleada en su fabricación (Chien y Menon, 1995) y a la presencia de minerales accesorios, como calcita y dolomita, que reducen significativamente la eficiencia de acidulación (Salas, 1989); contenidos de óxidos de Fe superiores a 1,9% (Menon *et al.*, 1995; Prochnow *et al.*, 1997); presencia de residuos insolubles debido a una disolución preferencial de los componentes más reactivos del apatito; formación de fosfatos insolubles de Fe-Al-Mg y complejos con fluoruros durante el proceso de acidulación (Di *et al.*, 1994 y Condron *et al.*, 1994).

Estos fertilizantes fosfatados de mediana solubilidad contienen formas solubles e insolubles de fósforo y ello ha sugerido la existencia de una interacción positiva entre dichas formas de P, la cual podría ser responsable en parte, por el incremento en efectividad observada en estos fertilizantes en comparación con las RF solas. Trabajos previos han sugerido que la presencia de la fuente soluble estimularía un desarrollo de las raíces que permitiría una mayor utilización de la porción insoluble contenida en la roca (Chien y Hammond, 1988; Rajan y Watkinson, 1992). La interacción positiva entre ambas formas de P ha sido igualmente atribuída a una solubilización adicional de la roca como consecuencia de su reacción con los protones producidos durante la hidrólisis del fosfato monocalcico presente en el superfosfato triple (Monkwunye y Chien, 1980).

Estos mecanismos de interacción han permanecido como hipótesis de trabajo dada la dificultad de las técnicas convencionales para identificar y cuantificar la procedencia del P utilizado por la planta. Por otra parte, trabajos conducidos con la ayuda de técnicas isotópicas (^{32}P) han arrojado conclusiones diferentes en cuanto a los posibles mecanismos participantes. Chien *et al.*, (1996) por ejemplo, encontraron una mayor utilización de P proveniente de la RF Florida Central cuando dicha roca se mezcló con superfosfato triple (SFT), lo cual atribuyeron a un estímulo en el desarrollo radical. Xiong *et al.* (1996) por su parte, no observaron incremento alguno al usar una mezcla similar, pero si detectaron una mayor utilización del SFT, por lo cual sugirieron que la RF es capaz de mejorar la disponibilidad de P de la fuente soluble o por lo menos su eficiencia de uso.

El presente trabajo tuvo como objetivo principal la evaluación, mediante técnicas isotópicas, de la utilización del P proveniente de la RF y el SFT en mezclas de ambas fuentes aplicadas en un suelo ácido bajo condiciones de invernadero y usando el maíz como cultivo indicador.

MATERIALES Y MÉTODOS

El suelo utilizado forma parte del horizonte superficial (0-15 cm) de un Typic Paleustult situado 7 km al norte de la localidad de El Pao, estado Cojedes, Venezuela, en una zona agroecológica de bosque seco tropical. El suelo fue secado al aire y tamizado para obtener un tamaño de agregados de 4 mm. Las principales características del suelo se muestran en el Cuadro 1.

CUADRO 1. Características del suelo utilizado en el experimento.

Característica	Resultado
Clasificación taxonómica	Typic Paleustult
Textura:	Franco arenoso
Arcilla (%)	12
Arena (%)	70
Limo (%)	18
pH (1:1, suelo: agua)	4,8
C orgánico total, gC kg ⁻¹	8,7
Pi extraído con resina, µgP g ⁻¹	0,5
P extraído con Bray II, µgP g ⁻¹	7,8
P Total, µgP g ⁻¹	285
P adsorbido obtenido mediante	40
Isotermas de adsorción a, µgP g ⁻¹	
Capacidad de intercambio catiónico, NH ₄ AcO pH 5,0, cmolckg ⁻¹	5,8
Al intercambiable en KCl, cmolckg ⁻¹	0,7

^aP adsorbido requerido para mantener una concentración de P en solución de 0,2 µgP ml⁻¹, obtenido mediante isotermas de adsorción de acuerdo al método de Fox y Kamprath (1970).

Roca fosfórica

Se usó la RFR en su condición natural, ésta proviene del yacimiento ubicado en la región centro-costera del estado Falcón. La composición química de esta roca molida a una granulometría <0,150 mm es la siguiente: P₂O₅ 27,1%, CaO 38,3%, MgO 0,11; Al₂O₃ 3,91% y Fe₂O₃ 1,42% (Fayard y Truong, 1990; Casanova, 1993). La misma es clasificada como una roca de alta reactividad con solubilidades en citrato de amonio (pH 7), ácido cítrico 2% y ácido fórmico 2% de: 11, 53 y 56% del P total, respectivamente (Zapata y Salas, 1991; Fayard y Truong, 1990). La longitud del eje cristalográfico de la francolita contenida en dicha roca es 9,386 Å (McClellan *et al.*, 1982). La RFR finamente molida (100% < 0,15 mm) fue usada como fuente para aplicación directa en la mezcla y como fuente para producir SFT en el laboratorio.

Superfosfato triple

Para la preparación del SFT en el laboratorio se usó RFR molida y ácido fosfórico grado reactivo (85%). La cantidad de ácido fosfórico requerida se calculó basado en la estequiometría de la reacción de acidulación y la composición química de la roca. La acidulación se efectuó mediante el procedimiento establecido por el International Fertilizer Development Center, el cual ha sido utilizado previamente a escala laboratorio para producción de fertilizantes fosfatados de mediana solubilidad a partir de rocas venezolanas (Salas, 1989).

Se usó un tiempo de curado de 1,5 semanas para asegurar la completa solubilización de la RF. La fuente de SFT fue empleada en dos modalidades: no marcado y marcado con ³²P. En el segundo caso, se usó el procedimiento ya descrito, sólo que el ácido fosfórico empleado en la acidulación contenía ³²P. El ácido fosfórico marcado se preparó al agregar una solución de ³²P al ácido fosfórico requerido para la acidulación, la solución se mantuvo en agitación continua por 10 horas para favorecer el intercambio isotópico.

La cantidad de ³²P agregada para el marcaje fue estimada para producir un SFT con una actividad específica aproximada de 50 MBq g⁻¹ P al momento de la siembra. Al final del período de curado, tanto el SFT marcado como el no marcado fueron secados en estufa a 60 °C por 48 h, luego de lo cual el material fue molido manualmente en un mortero de

ágata. Una muestra de SFT marcado seco se utilizó para la determinación de la actividad específica mediante análisis de ^{32}P y P total en el fertilizante. La actividad del ^{32}P fue determinada en un contador de centelleo líquido con uso del efecto Cerenkov. Los análisis de P total en el SFT marcado y no marcado se efectuaron colorimétricamente, método de Murphy y Riley (1962), después de digerir muestras de los fertilizantes con $\text{HClO}_4\text{-HNO}_3$ concentrado.

Experimento de invernadero

Se utilizaron técnicas isotópicas a objeto de identificar y cuantificar la procedencia del P absorbido por el maíz, *Zea mays* L., después de la incorporación conjunta de RFR y SFT. El procedimiento básico empleado ha sido previamente descrito por Zapata y Axmann (1995), preparando una solución que contenía ^{32}P y ^{31}P en proporciones tales que 50 mL de la misma aportara 7,4 MBq de ^{32}P y una dosis equivalente de portador (^{31}P) de 5 mgP kg^{-1} en la forma de KH_2PO_4 . Esta solución marcada con ^{32}P contenía una actividad de 0,148 MBq mL^{-1} . En el experimento en potes de 2 kg de suelo se establecieron cuatro tratamientos como se describe en el Cuadro 2. Las unidades experimentales fueron dispuestas según un diseño de bloques al azar con tres repeticiones.

CUADRO 2. Tratamientos usados en el experimento en potes de 2 kg de suelo y en dosis de P de 0; 12,5; 25; 50 y 100 mgP kg^{-1}

Tratamientos	Fuentes de P	Observaciones
1	Roca Fosfórica (RR)	+ 50 ml de solución marcada
2	Superfosfato Triple (SFT)	+ 50 ml de solución marcada
3	RR + SFT	+ 50 ml de solución marcada (50 % del P total aportado por cada fuente)
4	RR + SFT	SFT marcado

Los nutrimentos fueron incorporados, a los fines de suplir las cantidades óptimas, bajo las siguientes formas: Nitrógeno (100 mg kg^{-1}) como urea, potasio (80 mg kg^{-1}) como K_2SO_4 , magnesio (10 mg kg^{-1}) como MgSO_4 , cobre (3 mg kg^{-1}) como CuSO_4 , zinc (6 mg kg^{-1}) como ZnSO_4 y boro (1 mg kg^{-1}) como ácido bórico. Se sembraron semillas de maíz (Hibrido PB-8) en cada pote, dejando tres plantas en cada uno.

La biomasa aérea fue cosechada siete semanas después de la germinación, y secada a 60°C durante 48 h. El material seco se pesó y molió usando un molino Wiley. Muestras de 1 g de material molido fueron calcinadas a 550°C durante 4 h. Las cenizas se disolvieron con 10 ml de HNO_3 (1:10) y la suspensión transferida cuantitativamente a un balón aforado de 50 ml para análisis de ^{31}P , ^{32}P y Ca.

El P fue determinado colorimétricamente según el método de Murphy y Riley (1962), mientras que el calcio fue determinado por espectroscopía de absorción atómica. El análisis de radioactividad (^{32}P) en el extracto de planta se realizó mediante un contador de centelleo líquido con uso del efecto Cerenkov. Las correcciones por background y quenching químico se realizaron con el uso de blancos preparados a partir de plantas no marcadas. La actividad específica del P absorbido por la planta en cada tratamiento se calculó al dividir la radioactividad total obtenida entre la cantidad total de P en el extracto de planta.

Las cantidades de P absorbidas por la planta, provenientes de cada una de las fuentes evaluadas, se calcularon mediante el método de dilución isotópica descritos por Zapata y Axmann (1995) y Salas (1995).

La cantidad de P absorbida por la planta proveniente de la RFR en la mezcla RFR+SFT se obtuvo al restar la cantidad de P derivado del SFT en la mezcla, obtenido en el tratamiento 4, del P absorbido proveniente de la mezcla RFR+SFT, obtenido en el tratamiento 3. De igual forma, se obtuvieron los porcentajes de P absorbido por la planta proveniente del suelo (%Pdfs), la RFR (%Pdfr) o el SFT (%Pdff); para ello se dividieron las cantidades de P absorbidas provenientes de cada fuente, entre la cantidad total absorbida por la planta en cada tratamiento.

Los resultados de biomasa aérea para cada una de las fuentes evaluadas fueron representados a través de modelos de regresión cuadráticos en los cuales se usó la dosis de P como variable dependiente. Debido a que la cantidad de P absorbido por la planta, proveniente de las diferentes

fuentes, presentó un comportamiento lineal, se utilizó un modelo de regresión lineal con variables dummy a objeto de comparar los diferentes tratamientos.

Por otra parte, se efectuó una comparación de medias para determinadas combinaciones de fuentes y dosis mediante el uso de la prueba de Tukey con una probabilidad de 0,05. Los análisis estadísticos se llevaron a cabo con el programa SAS (1999). La efectividad agronómica relativa (EAR) también fue calculada isotópicamente, empleando para ello la absorción de P derivado de los diferentes tratamientos, según la fórmula general:

$$EAR = \left[\frac{\text{P absorbido proveniente del tratamiento}}{\text{P absorbido proveniente del SFT}} \right] \times 100$$

Del mismo modo, la EAR fue calculada como la relación de coeficientes de regresión lineal obtenidos entre el P absorbido y las dosis de P para los diferentes tratamientos y el SFT, de acuerdo al método sugerido por Chien *et al.* (1990).

Al final del experimento se colectaron muestras de suelo para efectuar diferentes análisis químicos. Muestras de suelo húmedo provenientes de los tratamientos RFR, RFR+SFT y SFT fueron utilizadas para determinar pH en agua (1:1) y Al intercambiable extraído con KCl (1N).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La incorporación conjunta de RFR y SFT en relación 1:1 aumentó significativamente, en un 10 %, la materia seca producida en comparación a la RFR sola (RFs, Figura 1). Un comportamiento cuadrático para la respuesta del cultivo a las diferentes dosis de las fuentes sugiere que el rendimiento máximo potencial estuvo influenciado por la fuente de P utilizada. Mientras que en el caso de los tratamientos RFR y RFR+SFT el máximo rendimiento fue alcanzado a partir de la dosis de 50 mgP kg⁻¹, se observó una respuesta creciente para el SFT en el mismo rango. Lo anterior sugiere una respuesta positiva a la disponibilidad de P y confirma observaciones previas las cuales destacan la influencia de la solubilidad de la fuente en el crecimiento temprano y la absorción de P por el maíz en suelos altamente deficientes en P (Salas, 1995).

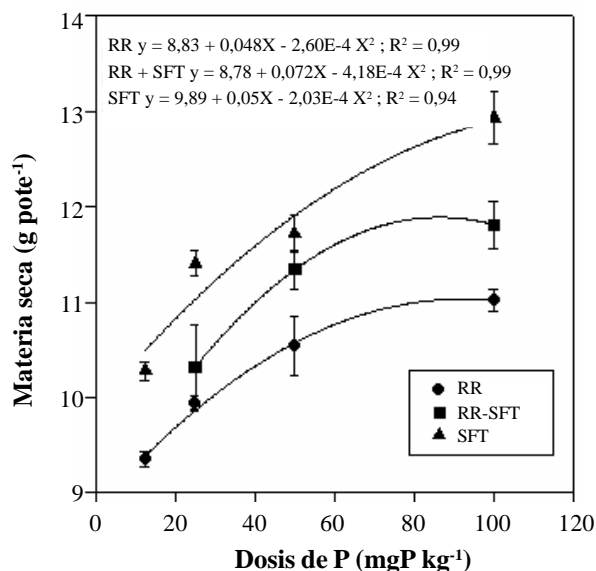


FIGURA 1. Rendimiento en materia seca del maíz en los diferentes tratamientos evaluados a nivel de invernadero.

La aplicación de técnicas isotópicas permitió calcular la cantidad total de P absorbido por el cultivo, proveniente de los diferentes tratamientos (Figura 2). La absorción de P para las diferentes dosis evaluadas presentó un comportamiento lineal influenciado por la fuente de fósforo utilizada. Mientras que no se detectaron diferencias estadísticas entre los coeficientes de regresión lineal obtenidos para el SFT (0,29) y la combinación RFR+SFT (0,28); estos valores fueron significativamente superiores ($P < 0,001$) al valor obtenido para la RFR (0,15). Si se considera cada dosis de P, en forma aislada, los resultados indican una mayor absorción de P proveniente del SFT, en comparación con los respectivos valores de P absorbido proveniente de la RFR sola o la combinación RFR+SFT ($P < 0,05$). Por otra parte, al expresar la absorción de P proveniente de los diferentes tratamientos en términos de efectividad agronómica relativa (EAR; Cuadro 3), se observó, la siguiente secuencia: $RFR < RFR+SFT < SFT$, influenciada por la solubilidad de la fuente utilizada. En este sentido, el tratamiento con menor solubilidad, RFR, mostró una EAR promedio de 53%, mientras que la combinación RFR+SFT obtuvo un valor intermedio de 72%.

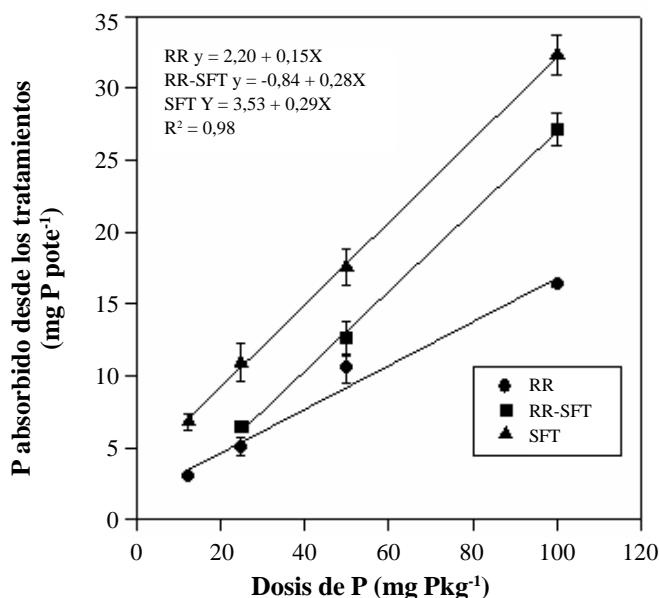


FIGURA 2. Cantidad de fósforo absorbido por el maíz en los diferentes tratamientos evaluados a nivel de invernadero.

El comportamiento intermedio observado para el tratamiento de incorporación conjunta de RFR y SFT se explicaría como el resultado de la incidencia simultánea de varios efectos. Primero, la presencia de una fracción soluble del P puede favorecer un desarrollo radical temprano lo cual promovería una mayor utilización del P disponible.

Resultados similares han sido encontrados por Yao y Barber (1986) quienes demostraron que la utilización de fosfato soluble estimula el desarrollo de raíces a tempranas etapas de crecimiento del maíz. Esta estimulación en el desarrollo radical podría no solamente favorecer una mayor absorción de fósforo proveniente del suelo, sino que también mejoraría la utilización de P proveniente de la RF (Chien y Hammond, 1988; Chien *et al.*, 1996). Un segundo efecto estaría vinculado a la presencia de minerales accesorios presentes en la RF, tales como calcita y dolomita, que podrían alterar la disponibilidad de otros nutrientes, tales como Ca y Mg (Xiong *et al.*, 1996); así como, modificar la capacidad de fijación del P en el suelo (Mokwunye y Chien, 1980).

CUADRO 3. Efectividad agronómica relativa (EAR) para las diferentes dosis y fuentes de P utilizadas en el experimento.

Fuentes de P	Efectividad agronómica relativa (EAR), %			
	Dosis de P, mgP kg ⁻¹			Según Chien <i>et al.</i> (1990)
	25	50	100	
RR	46 a	53	51	51 b
RR + SFT	55	72	84	97
SFT	100	100	100	100

^a EAR = [P absorbido por la planta proveniente del tratamiento/ P absorbido por la planta proveniente del SFT] * 100.

^b EAR calculada como la relación de coeficientes de regresión lineal obtenidos para el tratamiento y el SFT, respectivamente.

Finalmente, se ha sugerido que la incorporación conjunta de SFT y RF induciría una solubilización adicional de la roca debido a la acidificación del suelo producida durante la hidrólisis del SFT (Mokwunye y Chien, 1980).

Para evaluar estos efectos más detalladamente, se determinó el origen del fósforo absorbido por la planta con la ayuda de técnicas isotópicas. Los porcentajes de P absorbido por la planta proveniente tanto del suelo, como de las fuentes de P aplicadas solas o en combinación aparecen en el Cuadro 4. Los resultados indicaron fluctuaciones en el porcentaje de P derivado del suelo (%Pdfs), sin embargo, la cantidad de P en la planta proveniente del suelo resultó relativamente constante (entre 8,9 y 11,6 mgP pote⁻¹), independiente de la fuente o dosis de P utilizada. Estos valores relativamente constantes de P exportado desde el suelo, los cuales no se diferenciaron del control, 9,1 mgP pote⁻¹, sugieren que no hubo limitaciones en cuanto a la accesibilidad del sistema radical a las reservas de P del suelo.

Para evaluar la utilización de la fuente insoluble se determinó el porcentaje de P en la planta proveniente de la RF (%Pdfr) para aplicaciones de RFs y en combinación con SFT (Cuadro 4). En las aplicaciones de RFs, el porcentaje de P derivado de la RFR fluctuó entre 25 y 64%. Como se

esperaba, el porcentaje se incrementó con la dosis de RFR utilizada como consecuencia de un aumento en la contribución de dicha fuente en la nutrición de la planta. Estos valores son, sin embargo, superiores a los señalados por Kato *et al.* (1995) para las RFs de Carolina del Norte y Togo (10-15%).

Los valores más altos de %Pdfr obtenidos podrían atribuirse a la menor cantidad de portador utilizada en este estudio (5 mgP kg^{-1}), en comparación con la cantidad (25 mgP kg^{-1}) usada por Kato *et al.* (1995), lo cual posiblemente contribuyó en este caso, a incrementar la proporción de P proveniente de la RF. Ahora bien, es importante señalar que, dado las severas limitaciones de P existentes en el suelo bajo estudio, y el efecto que puede tener la presencia de portador (^{31}P) sobre la disolución de las RF (Khasawneh y Doll, 1978), se prefirió utilizar una menor cantidad de portador.

CUADRO 4. Porcentaje del fósforo total absorbido por el maíz proveniente de la roca Riecito (%PdRR), SFT (%PdSFT) y el suelo (%Pdsuelo), para cada una de las fuentes evaluadas bajo condiciones de invernadero.

Fuente de P	Dosis de PmgP kg ⁻¹	Pdsuelo mgP pote ⁻¹	%Pdsuelo	%PdRR	%PdSFT
RR	125	89	75	25	
	25	96	66	34	
	50	99	48	52	
	100	92	36	64	
SFT	125	101	68		32
	25	108	50		50
	50	94	35		65
	100	105	25		75
RR+SFT	25	104	62	13	25
	50	112	47	13	40
	100	116	30	16	54
Control		91			
HSD 0,05		20			

En relación a la absorción de P proveniente de la RF en el tratamiento de aplicación conjunta, los resultados (Cuadro 4) revelan que no hubo incremento en la utilización de esta fuente debido a su combinación con el SFT. Los valores promedios de %Pdfr, para el tratamiento RFR+SFT (13, 13 y 16%), fueron inferiores a los obtenidos para la RFs (25-64%). Lo anterior sugiere que la fuente de alta solubilidad en la mezcla es utilizada en mayor proporción por el cultivo, lo que disminuyó la participación relativa de la RFR.

Por otra parte, estos valores relativamente constantes de porcentaje Pdfr en el tratamiento RFR+SFT, a pesar de la dosis creciente de P, indican que los incrementos en la absorción de P por la planta, se atribuyen mayoritariamente a la fuente soluble y no a un incremento en la utilización de la RFR. En efecto, los resultados indicaron que un incremento en la dosis de P en el tratamiento RFR+SFT provocó sólo un aumento en la utilización del P proveniente del SFT (%Pdff), tal como se observa en el Cuadro 4, el cual pasó de 25% para la dosis 25 mgP kg⁻¹ a 54% para la dosis de 100 mgP kg⁻¹. Esto se corresponde con resultados de pH los cuales indican cambios significativos sólo para la RFR, mientras que los otros tratamientos no difirieron estadísticamente del control con pH 4,8 (Cuadro5).

La cantidad absoluta de P absorbido por la planta proveniente de la RFR (Pdfr) en aplicaciones de RFs o en combinación RFR+SFT apoyan las conclusiones anteriores. Al comparar las cantidades de P proveniente de la RFR (Pdfr) en el tratamiento RFR+SFT con los valores obtenidos para la RFs, se observó una menor utilización ($P < 0,05$) del P de la roca en el tratamiento RFR+SFT. Por ejemplo, a una misma dosis de RFR de 25 mgP kg⁻¹, la planta utilizó 5,0 mgP proveniente de la RFR en el tratamiento RFs, mientras que sólo utilizó 2,2 mgP de dicha fuente en la mezcla RFR+SFT. En promedio, hubo una disminución del 40% en la cantidad de P absorbido proveniente de la RFR cuando la misma fue aplicada en combinación con el SFT. Estos resultados difieren de aquellos obtenidos por Chien *et al.* (1996) al usar RF Florida Central en cultivos de maíz y maní. Estos autores obtuvieron un aumento en la absorción de P proveniente de la RF de 165 y 72% para maíz y maní, respectivamente, en aplicaciones conjuntas de RF y SFT.

El uso de técnicas isotópicas permitió además evaluar el efecto de la aplicación conjunta RFR+SFT sobre la utilización del P proveniente del SFT. A diferencia del comportamiento observado para la absorción de P proveniente de la RFR, la aplicación de RFR+SFT produjo un

incremento significativo en la absorción de P proveniente del SFT para la dosis más alta de SFT (50 mgP kg⁻¹). En este caso, la incorporación conjunta de SFT y RFR incrementó la absorción de P proveniente del SFT en un 20%. No se encontraron diferencias estadísticas entre los tratamientos RFR sola y RFR+SFT para las dosis de 12,5 y 25 mgP kg⁻¹ de SFT.

CUADRO 5. Efecto de las fuentes evaluadas sobre el pH y Al intercambiable medido al final del experimento^a.

Tratamiento	pH	Al intercambiable (cmol _c kg ⁻¹)
RFR	5,20 a	0,45 b
SFT	4,61 b	0,81 a
Control	4,80 b	0,70 a

^a Mediciones efectuadas en los tratamientos RR y SFT aplicados a una dosis de 50 mgP kg⁻¹.

El hecho de que la combinación de ambas fuentes haya favorecido relativamente más la absorción de P proveniente de la fuente soluble en comparación con la fuente insoluble, sugiere que la RFR podría contribuir a mejorar la disponibilidad de P del SFT o su eficiencia de uso. Trabajos previos han indicado que aplicaciones de RF pueden mejorar la disponibilidad de P soluble al reducir la capacidad de fijación de P del suelo (Mokwunye y Chien, 1980). A pesar de no existir, en el presente estudio, diferencias en el pH del suelo entre los tratamientos RFR+SFT y el control, los resultados indicaron una disminución significativa del contenido de Al intercambiable en el suelo para el tratamiento RR+SFT (Cuadro 5), ello sugiere una posible reducción de la capacidad de fijación de P al combinar RFR con SFT.

El valor agronómico de las RF de mediana y alta reactividad como fuentes de calcio ha sido ampliamente reconocido, especialmente en suelos ácidos con alta saturación de Al (Hellmuns *et al.*, 1989, Xiong *et al.*, 1996). En el presente estudio, a pesar de que una cantidad significativa de Ca fue incorporada como SFT (12,5 - 50 mg Ca kg⁻¹), el cultivo mostró una mayor absorción del elemento en el tratamiento RFR+SFT, en comparación con el tratamiento que recibió sólo SFT (Cuadro 6).

Esta respuesta positiva a una mayor suplencia de Ca en el tratamiento RFR+SFT hace factible la inferencia de que un mejor estado nutricional de la planta haya contribuido también a una mejor utilización del SFT.

CUADRO 6. Efecto de las fuentes evaluadas sobre la absorción de calcio por el maíz.

Tratamiento	Cantidad de calcio absorbido (mg pote ⁻¹)
RFR	32 a
SFT	41 a
Control	11 b

^a Mediciones efectuadas en los tratamientos RR y SFT aplicados a una dosis de 50 mg P kg⁻¹.

CONCLUSIONES

- Los resultados de este trabajo indican que la incorporación conjunta de RFR con SFT indujo una mayor utilización del P proveniente del SFT.
- Se observó una disminución del 40% en la absorción de P proveniente de la RF cuando la misma se combinó con el SFT. Un uso preferencial del SFT por parte del cultivo; así como, una posible disminución de la disolución de la RF residual, podrían ser algunos de los mecanismos responsables de este comportamiento.
- Los resultados sugirieron por otra parte, una interacción positiva de ambas fuentes en la mezcla RFR+SFT, favorable al uso del SFT, atribuible a un efecto indirecto asociado a la suplencia de otros nutrimentos, posiblemente Ca; o a una mejora en la disponibilidad y absorción de P de la fuente soluble.
- Una EAR promedio de 72% obtenida mediante técnicas isotópicas para la mezcla RFR+SFT, destaca el efecto benéfico de la incorporación conjunta de ambas fuentes.
- La extrapolación de la presente información para representar fertilizantes fosfatados parcialmente solubles queda sujeta a estudios más específicos en esta área.

AGRADECIMIENTO

Los autores desean expresar su agradecimiento a los Drs. Felipe Zapata y Jean-Claude Fardeau por su asistencia y valiosas sugerencias en el transcurso de la investigación.

BIBLIOGRAFÍA

CASANOVA, E. 1993. Las rocas fosfóricas y su uso industrial en Venezuela. Apuntes Técnicos PALMAVEN. PDVSA, Caracas. 124 p.

CHIEN, S. and L. HAMMOND. 1988. Agronomic evaluation of partially acidulated phosphate rock in the tropics: IFDC's experience. Pap. Ser. IFDC-P7. Int. Fert. Dev. Center. Muscle Shoals, AL. 26 p.

CHIEN, S., P. W. SALE and D. FRIESEN. 1990. A discussion of the methods for comparing the relative effectiveness of phosphate fertilizers varying in solubility. Fert. Res. 24: 149-157.

CHIEN, S. H. and R. MENON. 1995. Agronomic evaluation of modified phosphate rock products. Fert. Res. 41(3):197-209.

CHIEN, S. H., R. MENON and K. BILLINGHAM. 1996. Phosphorus availability from phosphate rock as enhanced by water-soluble phosphorus. Soil Sci. Am. J. 60(4):1173-1177.

CONDRON, L., H. DI, A. CAMPBELL, K. GOH and R. HARRISON. 1994. Effects of partial acidulation on chemical and mineralogical characteristics of residual phosphate rocks. Fert. Res. 39(3):179-187.

DI, H., L. CONDRON, A. CAMPBELL, K. GOH and I. CORNFORTH. 1994. Causes for the reduced reactivity of phosphate rock residues in partially acidulated phosphate rocks. Aust. J. Soil Res. 32: 95-104.

FAYARD, C. et B. TRUONG. 1990. Caracterisation des phosphates naturels du Venezuela misc an point des engrais pour essais agronomiques. Institutes de Recherches Agronomiques Tropicales et de Cultures Vivrieres. IRAT. 168 p.

FOX, R. and E. KAMPRATH. 1970. Phosphate sorption isotherms for evaluating the phosphate requirements of soil. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 34:902-907.

HELLUMS, D., S. CHIEN and J. TOUCHTON. 1989. Potencial agronomic value of calcium in some phosphate rocks from South America and West Africa. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53(2):459-462.

KATO, N., F. ZAPATA and H. AXMANN. 1995. Evaluation of the agronomic effectiveness of natural and partially acidulated phosphate rocks in several soils using ^{32}P isotopic dilution techniques. *Fert. Res.* 41(3):235-242.

KHASAWNEH, F. and E. DOLL. 1978. The use of phosphate rock for direct application. *Adv. Agron.* 30:159-206.

McCLELLAN, G. H., F. N. SAAVEDRA and M. COOPER. 1982. Characteristics of some Latin American phosphorites. First Meeting of the Southern Hemisphere on Mineral Technology. Rio de Janeiro. Brazil. 1:105-113.

MENON, R., S. H. CHIEN and D. HELLUMS. 1995. Iron and aluminum oxide influence on agronomic effectiveness of modified phosphate rocks. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59(6):1.762-1.767.

MOKWUNYE, A. and S. CHIEN. 1980. Reactions of partially acidulated phosphate rock with soils from the tropics. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44: 477-482.

MURPHY, J. and J. P. RILEY. 1962. A modified single method for the determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chim. Acta.* 27: 31-36.

PROCHNOW, L., J. KIEHL and B. VAN RAIJ. 1997. Influence of cationic impurities in acidulated phosphates on the availability of phosphorus to two corn crops. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 28(15-16):1 375-1 391.

RAJAN, S. and J. WATKINSON. 1992. Unacidulated and partially acidulated phosphate rock: Agronomic effectiveness and the rates of dissolution of phosphate rock. *Fert. Res.* 33(3):269-277.

SALAS, A. 1989. Investigation of the utilization of two phosphate rocks from Venezuela. Research Report. IFDC, Muscle Shoals, AL. 17 p.

SALAS, A. 1995. Evaluación de la aplicación de fertilizantes fosfatados de mediana solubilidad en un Paleustult del estado Cojedes. Trabajo de ascenso a la categoría de Asistente. Maracay, Ven. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Agronomía. 78 p.

SAS INSTITUTE. 1999. SAS Users Guide, Vol. 2. Versión 8 ED. SAS Inst. Cary, NC.

XIONG, L., Z. ZHOU and R. LU. 1996. Enhanced plant growth by uniform placement of superphosphate with rock phosphate in acid soils. *Comm. Plant and Soil Anal.* 27(15/17):2837-2850.

YAO, J. and S. BARBER. 1986. Effect of one phosphorus rate placed in different soil volumes on P uptake and growth of wheat. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 17:819-827.

ZAPATA, F. and H. AXMANN. 1995. ^{32}P isotopic techniques for evaluating the agronomic effectiveness of phosphate rock materials. *Fert. Res.* 41(3):189-195.

ZAPATA, R. y A. SALAS. 1991. Uso de la termodinámica para evaluar la reactividad de las rocas fosfóricas venezolanas. II Reunión de la red latinoamericana de roca fosfórica. San Cristóbal, estado Táchira.